

## PENDUGAAN KERUSAKAN AKIBAT IMPAK PADA BUAH APEL DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

(PREDICTION OF IMPACT DAMAGE IN APPLE USING FINITE ELEMENT METHOD)

Yuwana<sup>1</sup>

### ABSTRAK

*Damage caused by impact in apple was predicted using finite element method. Apple model was axi-symmetric three dimensions consisted 7794 tetrahedral elements with 1612 nodes representing an apple having 2.5 MPa Young modulus, 0.145 Poisson ratio, 134.5 g mass and 164.4 cm<sup>3</sup>. Impact was simulated by employing an acceleration of 135 g ( $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ) on the model. During simulation, damage was supposed to occur when the stress suffered by cell was greater than its strength. The strength of cell was adopted from the previous study which was 0.44 MPa. Zone of damage resulted by impact was compared to the damage of the real apple caused by impact with the same energy level. The result of the simulation indicated that the zone of damage in the apple matched to the damage of the real apple. This finding suggested that the finite element method could be employed to accurately predict the damage mechanism caused by impact on apple.*

**Keywords :** apple, finite element

### PENDAHULUAN

Memar merupakan penyebab utama penurunan kualitas pada saat pemasaran buah apel (Siyami et al., 1988; Studman, 1990; Peleg, 1984). Memar dapat terjadi karena dampak (benturan) ataupun tertekannya buah oleh benda lain mulai dari saat panen sampai ke tangan konsumen. Studi lapangan tentang sistem penanganan buah memperlihatkan bahwa mayoritas memar terjadi akibat terimpaknya buah terhadap berbagai macam permukaan dan dampak sesama buah (Banks, 1991; Bollen & Dela Rue, 1990).

Sifat mekanik memar telah dipelajari melalui dampak buah terhadap berbagai jenis permukaan dan berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk mengartikan hasilnya (Schoorl & Holt, 1980; Diener et al., 1979; Franke & Rohrbach, 1981; Horsfield et al., 1972; Brown et al., 1990).

Selama dampak, teramati empat tahap kejadian. Pada permulaan dampak, deformasi elastis terjadi dan deformasi ini akan lenyap setelah dampak selesai. Pada tahap kedua, deformasi plastis mulai terbentuk pada saat tekanan rata-rata melebihi batas ketahanan tekan dinamis (dynamic yield stress) buah; sebagian dari deformasi plastis ini tidak lenyap pada saat dampak berakhir. Pada tahap berikutnya, deformasi berlanjut dan deformasi plastis penuh terbentuk pada saat tekanan rata-rata turun di bawah batas ketahanan tekan dinamis buah. Akhirnya tekanan dan deformasi elastis yang tersimpan pada buah lenyap pada saat dampak berakhir

sedangkan deformasi plastis membekas secara permanen pada buah yang biasanya tampak sebagai memar buah.

Dengan menggunakan "force transducer" gaya dampak selama dampak (gaya fungsi waktu) dapat didokumentasikan. Selanjutnya bermacam-macam parameter dampak dapat dihitung berdasarkan kurva "gaya-waktu" tersebut (Barquins & charmet, 1994a, & 1994b; Franke & Rohrbach, 1981; Lichtensteiger et al., 1988; Meredith et al., 1990; Zhang & Brusewitz, 1991; Zhang et al., 1994).

Beberapa peneliti telah mengeksplorasi parameter-parameter dampak ini dan hubungannya dengan memar pada buah (De Baerdemaeker et al., 1978; Delwiche et al., 1989; Gan-More & Galili, 1987). Diener et al. (1979) mencatat bahwa volume memar berkorelasi linier dengan tinggi jatuh buah dari ketinggian 10, 16 dan 34,29 cm. Lang (1994) mengembangkan hubungan antara tenaga dampak yang tidak menimbulkan memar, kecepatan dampak dan massa buah untuk beberapa varietas apel. Dia menyimpulkan bahwa tenaga yang terpakai pada deformasi terdiri atas tenaga dinamik dan tenaga quasi-statik, walaupun hipotesa ini belum dibuktikan secara experimental.

Brusewitz dan Barch (1989) mencoba mengembangkan hubungan antara volume memar dengan beberapa karakteristik parameter dampak untuk lima varietas apel yang disimpan dalam ruang dengan atmosfer terkendali dan tidak terkendali selama 250 hari. Dampak dihasilkan dengan tinggi jatuh buah antara 5 sampai 25 cm. Mereka menyimpulkan bahwa ratio antara volume memar dengan tenaga dampak naik selama penyimpanan, lamanya dampak naik dengan lamanya penyimpanan dan logaritma dari ratio antara gaya maksimum dan waktu bervariasi linier dengan logaritma tenaga dampak.

Siyami et al. (1988) meneliti tentang pengaruh tinggi jatuh buah pada beberapa jenis permukaan untuk buah apel varietas "Ida Red". Mereka mendapatkan bahwa dibandingkan dengan teori Hertz, teori Hertz dimodifikasi dan teori plastisitas, regresi berganda lebih efektif sebagai penduga diameter memar.

Chen dan Yazdani (1991) menyarankan bahwa untuk buah apel varietas "Golden" yang diimpakkan pada beberapa jenis permukaan dampak, parameter yang lebih berhubungan dengan volume memar adalah kemiringan maksimum kurva percepatan fungsi waktu, jumlah deformasi maksimum buah dan permukaan dampak, tenaga terserap, gaya maksimum, lamanya dampak dan tebal permukaan dampak. Dengan menggunakan percobaan yang serupa, Gan-Mor dan Mizrach (1992) menunjukkan bahwa dampak dengan ketinggian 30 cm pada sebuah pelat metal dengan ketebalan 0,7 mm tidak menimbulkan memar buah.

<sup>1</sup> PS Teknologi Industri Pertanian Fakultas Pertanian UNB

Yuwana (1995) menunjukkan bahwa parameter dampak yang relevan dengan volume memar apel varietas "Golden Delicious" adalah percepatan maksimal, perubahan kecepatan dampak dan lamanya dampak. Yuwana & Duprat (1996) juga menduga volume memar dengan menggunakan teori Hertz berdasarkan tinggi jatuh buah dan modulus elastisitas buah.

Turczyn et al. (1986) memperlihatkan bahwa ketinggian jatuh 80 cm atau lebih untuk kentang pada permukaan keras menyebabkan memar pada buah tersebut. Dampak lebih besar dari 20-30 gram pada pengemas menimbulkan akibat yang serupa.

Menggunakan buah elektronik ("instrumented sphere"), Sober et al. (1996) menemukan bahwa batas benturan penyebab memar untuk apel varietas "Golden Delicious" dan apel varietas "Paula Red" masing-masing adalah 30 gram dan 40 gram, yang dicapai pada 3 hari setelah panen.

Dengan majunya teknologi elektronik dan komputer perhitungan matematis berkenaan fenomena mekanik dapat dilakukan dengan cepat. Diantara model matematis yang dapat diaplikasikan pada mekanika benda padat adalah metode 'finite element'.

### Tujuan

Tulisan ini menyajikan pendugaan memar dengan menggunakan elemen hingga (finite element).

### Teori

Berdasarkan kaidah mekanika benda padat, apabila suatu obyek dikenai tekanan dari luar maka deformasi yang terjadi dapat diekspresikan dalam bentuk :

$$u_{ij} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

Obyek tersebut cenderung untuk mempertahankan posisi seimbang dengan adanya tekanan internal yang dapat direpresentasikan oleh tekanan simetris ordo kedua  $\sigma_{ij}$ . Tekanan ini menyebabkan adanya gaya-gaya  $F_i$ , yang seimbang pada setiap titik dalam obyek yang dapat diformulasikan sebagai

$$F_i = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

Formulasi fenomena yang terjadi harus diselesaikan melalui hukum yang berlaku untuk obyek yang sedang menderita tekanan. Jika vektor deformasi dinotasikan  $\epsilon$ , bekerja pada obyek yang memiliki sifat elastik linier maka Hukum Hooke dapat dituliskan sebagai

$$\{\sigma\} = [C] \cdot \{\epsilon\} \text{ atau } \{\epsilon\} = [D] \cdot \{\sigma\} \quad (3)$$

dimana [C] adalah matrik rigiditas solid dan [D] adalah matrik fleksibilitas.

Dalam suatu solid dengan fleksibilitas  $\Omega$ , persamaan di atas dapat disajikan dalam bentuk integral sebagai

$$\int_{(\Omega)} \delta \epsilon^T \cdot \sigma \cdot d\Omega = \int_{(\Omega)} \delta u^T \cdot F_v \cdot d\Omega + \int_{\Gamma(\Omega)} \delta u^T \cdot F_s \cdot d\Omega + \sum \delta u_i \cdot F_i \quad (4)$$

Rumus ini didasarkan pada deskritisasi masalah dengan metode elemen hingga (Dhatt & Touzot, 1984). Kita tidak

mendiskripsikan secara detail persamaan-persamaan lanjutannya. Secara singkat kita mempekerjakan sistem linier dengan model

$$[C] \cdot \{U\} = [F] \quad (5)$$

dimana {U} merupakan vektor perpindahan simpul terinterpolasi dan [F] merupakan solisitasi gaya.

Program yang ditulis dalam bahasa C++ digunakan dalam pemodelan elemen hingga dan perhitungannya (Chambarel, 1992).

### METODE PENELITIAN

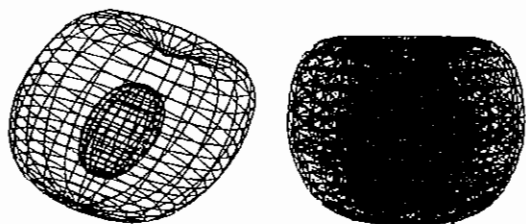
Pada penelitian ini digunakan metode simulasi. Buah apel dimodelkan secara geometris. Model apel berbentuk axisimetrik tiga dimensi yang terdiri 7794 elemen bidang empat dan 1612 simpul yang merepresentasikan sebuah apel dengan modulus elastisitas 2,5 MPa, Poisson ratio 0,145, massa 134,5 gram dan volume 164,4 cm<sup>3</sup>. Apel model ini diberi sifat-sifat mekanik yang menggambarkan sifat-sifat riil sebuah apel. Untuk mensimulasikan benturan, apel model dikenai pembebanan dengan percepatan 135 g, dan dapat diekspresikan sebagai :

$$\gamma_i \cdot \rho = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad (6)$$

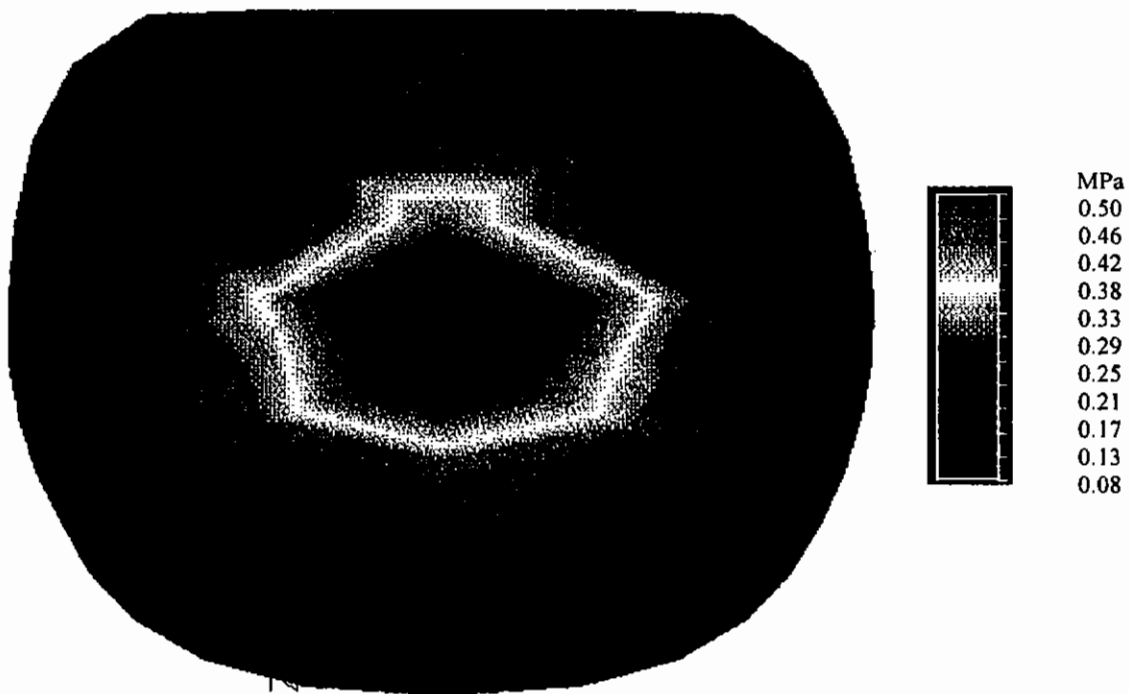
dimana  $\gamma$  adalah percepatan. Pada saat dikenai pembebanan, apel model diletakkan pada bidang dengan luasan kontak 4 cm<sup>2</sup>. Kerusakan apel digambarkan oleh kerusakan sekelompok sel. Sel akan pecah atau rusak apabila kekuatannya dilampaui oleh beban yang dikenakan. Berdasarkan percobaan batas kekuatan sel adalah 0,44 MPa (Yuwana, 1997). Zona kerusakan adalah zone dimana distribusi tekanan lebih besar dari 0,44 MPa. Zona kerusakan apel model kemudian dibandingkan dengan zona kerusakan apel riil dengan sifat fisik sama dengan model yang dikenai benturan dengan tingkat energi yang sama dengan jalan menjatuhkannya setinggi 15 cm. Sampel adalah buah apel varietas Golden Delicious yang baru saja dipanen.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 1 memperlihatkan model geometris apel yang tersusun dari 7794 elemen bidang empat dan 1612 simpul. Disini juga diperlihatkan bagian tengah dari apel tersebut yang mempunyai elemen-elemen lebih rapat (kecil). Gambar 2 memperlihatkan permukaan yang rusak setelah model apel dikenai pembebanan. Permukaan rusak disini adalah zona dimana tekanan melebihi batas kekuatan sel (0,44 MPa) yang mencapai kedalaman 9 mm.



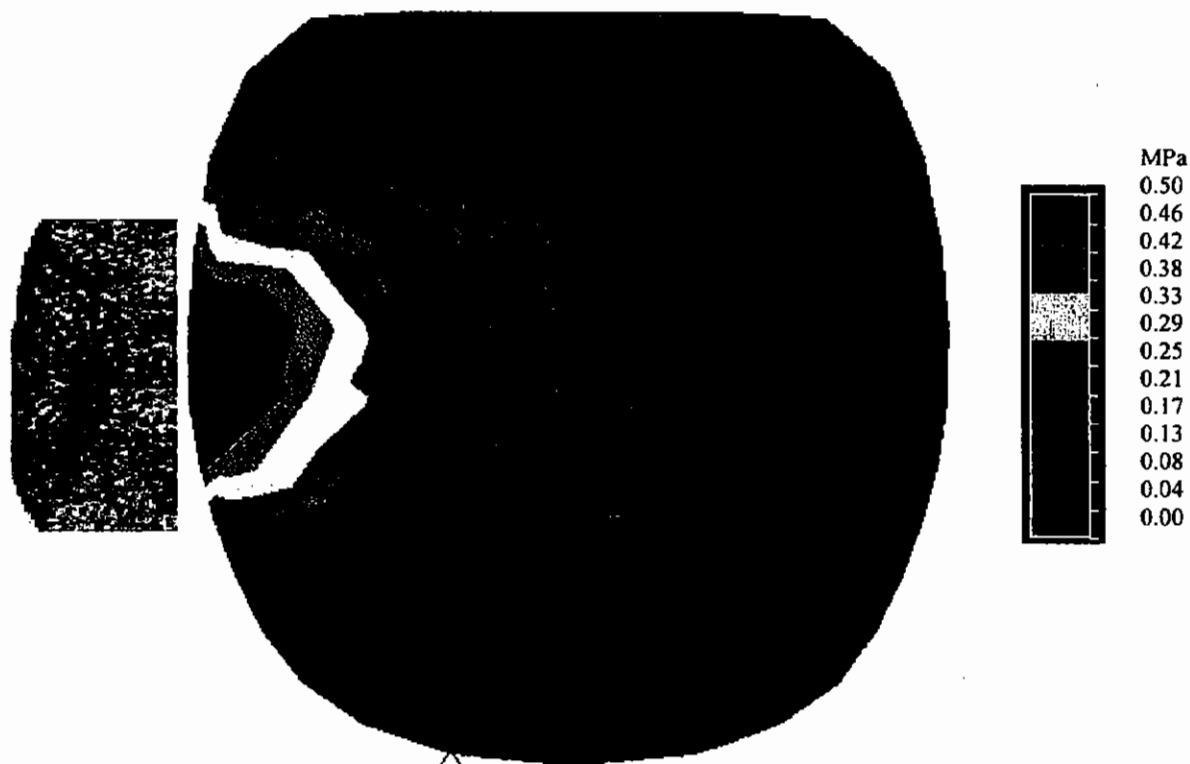
Gambar 1. Model geometris apel dengan elemen-elemen penyusunnya.



Gambar 2. Memperlihatkan permukaan yang rusak setelah model apel dikenai pembebanan.

Gambar 3 adalah penampang melintang zona yang rusak pada apel model dibandingkan dengan penampang melintang zona yang rusak teramati pada apel riil yang dengan kedalaman 8,92 mm dan diameter 21,8 cm. Gambar

zona riil diambil dengan kamera setelah diadakan pembelahan bagian membran apel yang dihasilkan oleh benturan.



Gambar 3. Potongan melintang zona rusak model apel dibandingkan dengan penampang melintang zona rusak riil pada apel.

Pada gambar teramati bahwa di daerah pusat apel model terdapat zone dimana tekanan melebihi tekanan di bagian lebih luar. Hal ini menggambarkan respon dari bagian dalam apel yang mempunyai sifat mekanik cukup berbeda dengan bagian lebih luar. Disini diperlihatkan adanya konsentrasi tekanan diantara zona transisi antara bagian daging buah dengan bagian tengah atau inti. Terlepas dari kejadian ini gambar di atas memperlihatkan bahwa bentuk kerusakan pada apel model sangat mirip dengan bentuk kerusakan riil yang teramati pada apel. Dengan demikian metode « finite element » dapat dipakai untuk menduga mekanisme kerusakan pada buah apel akibat benturan.

## KESIMPULAN

Model apel berbentuk axisimetrik tiga dimensi yang terdiri 7794 elemen bidang empat dan 1612 simpul yang merepresentasikan sebuah apel dengan modulus elastisitas 2,5 MPa, Pisson ratio 0,145, massa 134,5 gram dan volume 164,4 cm<sup>3</sup> pada saat dikenai percepatan 135 kali gravitasi bumi ( $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ) menghasilkan zona kerusakan sangat mirip dengan zona kerusakan riil pada apel. Hal ini membuktikan bahwa metode « finite element » dapat dipakai untuk menduga mekanisme kerusakan pada buah apel akibat benturan.

## DAFTAR PUSTAKA :

- Banks N.H.** 1991. Reduction of mechanical damage in New Zealand apples. A progress report to the New Zealand Apple and Pear Marketing Board. Massey University, Palmerston North, New Zealand.
- Barquins M., Charmet J.C.** 1994a. Influence des propriétés superficielles sur le rebond d'une bille rigide sur la surface plane et lisse d'un massif de caoutchouc naturel souple. C.R. Acad. Sci. Paris, t 318, Série II : 721-726.
- Anonim.** 1994b. Le rebond de projectiles sphériques : Une méthode simple pour déterminer les propriétés superficielles et le comportement rhéologique de caoutchouc naturel. C.R. Acad. Sci. Paris, t 318, Série II : 852-860.
- Bollen A.F., Dela Rue B.T.** 1990. Impact analysis using video with an instrumented sphere. Proceedings of the ASAE, paper 90-6078.
- Brown, G.K., Schulte-Pason, N.L., Timm, E.J. Burton, C.L., Marshall, D.E.** 1990. Apple packing line impact damage relation. Transactions of the ASAE 6(6) : 759-764.
- Brusewitz G.H., Bartsch J.A.** 1989 : Impact parameters related to postharvest bruising of apples. Transactions of the ASAE 32(3): 953-957.
- Chambarel A.,** 1992. Application du génie logiciel à l'élaboration d'une nouvelle conception des codes d'éléments finis. "Strucome", Paris (France), 1992/11/16-18.
- Chen P., Yazdani R.** 1991 : Prediction of apple bruising due to impact on different surfaces. Transactions of the ASAE 34(3) : 956-961.

## DAFTAR SIMBUL

$u_{ij}$	=	matrik deformasi
$\delta u_i / \delta x_j$	=	derivative $u_i$ terhadap $x_j$
$\delta u_j / \delta x_i$	=	derivative $u_j$ terhadap $x_i$
$F_i$	=	gaya seimbang pada setiap titik dalam obyek
$\sigma_{ij}$	=	tekanan simetris ordo kedua
$\delta \sigma_{ij} / \delta x_i$	=	derivative $\sigma_{ij}$ terhadap $x_i$
$\sigma$	=	tekanan
$\varepsilon$	=	vektor deformasi
$C$	=	matrik rigiditas
$D$	=	matrik fleksibilitas
$\delta \varepsilon$	=	perubahan deformasi
$\Omega$	=	fleksibilitas
$\delta \Omega$	=	perubahan matrik fleksibilitas
$F_v$	=	gaya volumetrik
$F_s$	=	gaya permukaan
$\delta u_i$	=	perubahan matrik deformasi
$F_i$	=	gaya internal
$U$	=	vektor perpindahan simpul
$F$	=	solisitasi gaya
$\gamma_i$	=	percepatan
$\rho$	=	kerapatan

- Delwiche M.J.** 1987 : Theory of fruit firmness sorting by impact forces. Transactions of the ASAE 30(4) :: 1160-1171.
- Diener R.G., Elliot K.C., Nesselroad P.E., Ingle M., Adams R.E., Blizard S.H.** 1979 : Bruise energy of peaches and apples. Transactions of the ASAE 22(2): 287-290.
- De Baedermaeker, J.L., Segerlind, L.J., Murase, H., Merva, G.E.** 1978. Water potential effect on tensile and compressive failure stresses of apple and potato tissue. ASAE Paper No. 78-3057, ASAE, St. Joseph, M.I., 49085.
- Delwiche, M.J., Tang, S., Mehlschau, J.J.** 1989. An impact force response fruit firmness sorter. Transactions of the ASAE 32(1) : 321-326.
- Franke J.E., Rohrbach R.P.** 1981 : A non linear impact model for a sphere with a flat plate. Transactions of the ASAE 24(6) : 1683-1686.
- Dhatt, G., Touzot, G.,** 1984. Une présentation de la méthode des éléments finis. Maloine, Paris, 543 p.
- Gan-Mor, S., Galili, N.** 1987. Model for failure and plastic flow in dynamic loading of spheres. Transactions of the ASAE 30(5) : 1506-1511.
- Gan-Mor, S., Mizrach, A.** 1992. Analytical model for plastic impact of fruit on thin plate. Transactions of the ASAE 35(6) : 1869-1872
- Horsfield B.C., Fridley R.B., Claypool L.L.** 1972 : Application of theory of elasticity to the design of fruit harvesting and handling equipment for minimum bruising. Transactions of the ASAE 15(4) : 746- 753.

- Lang, Z.** 1994. The influence of mass and velocity on the maximum allowable impact energy of apples. *Journal Agricultural. Engineering Research* 57(3) : 213-216.
- Lichtensteiger M.J., Holmes R.G., Hamdy M.Y., Blaisdell J.L.** 1988 : Impact parameters of spherical viscoelastic objects and tomatoes. *Transactions of the ASAE* 31(2) : 595-602
- Peleg K.** 1984 : A mathematical model of produce damage mechanisms. *Transactions of the ASAE* 27(1) : 287-293.
- Roudot A.C., Grotte M., Duprat F., Arakelian J.** 1989 : Comparaison de la résistance aux chocs et de la fermeté de deux variétés de pommes au cours de l'entreposage au froid. *Sciences des Aliments* 9 : 319-333.
- Schoorl D., Holt J.E.** 1980 : Bruise resistance measurements in apples. *Journal of Texture Studies* 11: 389-394.
- Siyami S., Brown G.K. Burgess G.J. Gerrish J.B. Tennes B.R. Burton C.L., Zapp R.H.** 1988 : Apple impact bruise prediction models. *Transactions of the ASAE* 31(4) : 1038-1046.
- Sober S.S., Zapp H.R., Brown, G.K.** 1990 : Simulated packing line impacts for apple bruise prediction. *Transactions of the ASAE* 33(2) : 629-636.
- Studman C.J.** 1990. Apple handling damage in New Zealand. *Preceedings of the ASAE* , paper 90-6079.
- Turczyn, M.T., Grant, S.W., Ashby, B.H., Wheaton, F.W.** 1986. Potato shatter bruising during laboratory handling and transport simulation. *Transactions of the ASAE* 29(4) : 1171-1175.
- Yuwana.** 1995. Parameter-parameter impak : Hubungannya dengan memar dan kekerasan buah. *Jurnal Ilmiah Ilimu-ilmu Pertanian* 3(2) : 141-147.
- Yuwana, Duprat F.** 1996. Postharvest impact bruising of apples as related to the modulus of elasticity. *International Agrophysics*, 10, 131-138.
- Yuwana,** 1997. Contribution a l'etude des propriétés de resistance mecanique des fruits (Cas de la pomme Golden Delicious). Ph.D. Thesis Université de la Méditerranée (Aix-Marseille II), France.
- Zhang, X. and Brusewitz, G.H.** 1991. Impact force model related to peach firmness. *Transactions of the ASAE* 34(5) : 2094-2098.
- Zhang, X., Stone, M.L., Chen, D., Maness, N.O. and Brusewitz, G.H.** 1994. Peach firmness determination by puncture resistance, drop impact and sonic impulse. *Transactions of the ASAE* 37(2) : 495-500.